

УДК 628.917

В. М. Сорокін,
док. техн. наук,
Інститут фізики
напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова
НАНУ

В. П. Копнін ,
А. Ф. Сєрий
Товариство з обмеженою
відповідальністю
«Науково-виробнича
фірма «Газотрон-Лайт»

СВІТЛОДІОДНА ЛАМПА-СВІТИЛЬНИК І ДЕЯКІ НЮАНСИ ТЕПЛОВОГО ОПОРУ

Вступ

Останнім часом ринок джерел світла поповнився великою кількістю так званих ретрофітів, - світлодіодних ламп (СДЛ), призначених для прямої заміни ламп розжарювання в існуючих світильниках. Вони різні за формою і розмірами, але є одна спільна риса - наявність досить масивного алюмінієвого (рідше керамічного) радіатора.

Світлодіодні лампи значно ефективніші від ламп розжарювання, але і в них значна частина (60-80 %) споживаної світлодіодами (СД) електроенергії виділяється у вигляді тепла [1]. На відміну від ламп розжарювання, в яких тепло виділяється головним чином у вигляді випромінювання, тепло, що виділяється СД, не таке безневинне - його конче необхідно відводити. З ростом температури кристала падає інтенсивність випромінювання світлодіода, змінюються його спектральні характеристики, зменшується строк служби. Тому вибір радіатора для відведення тепла при розробці освітлювальних приладів на світлодіодах є першочерговою проблемою.

Другою за важливістю проблемою застосування СД в освітлювальних приладах є необхідність зменшення точкової яскравості, з якою пов'язують ефекти блискотості і осліпленості.

Проблеми ці різні по суті але шляхи їх вирішення співпадають. Щоб розсіяти більшу кількість тепла, необхідна більша площа поверхні радіатора. Щоб розсіяти більшу кількість світла, необхідна більша площа поверхні світлорозсіювача.

Проблемі вирішення задачі створення системи відводу тепла від потужних світло діодів і як слідство розробці конструкції світлодіодної лампи з високою надійністю та можливістю прямої заміни ламп розжарювання присвячена робота.

Експеримент

На рис.1 показаний експериментальний зразок світлодіодної лампи, в якому в якості світлорозсіювача вибрано скляну кулю діаметром 110 мм молочного кольору. Саме кулеподібна форма світлорозсіювача в результаті багатократного відбиття світлових променів від її внутрішньої поверхні, створює рівномірний розподіл світла, що проходить назовні, а значна поверхня кулі повністю нівелює ефекти блискотості і осліпленості. З тих же загальних міркувань вибрано зонтоподібний радіатор, сформований з тонколистового матеріалу.

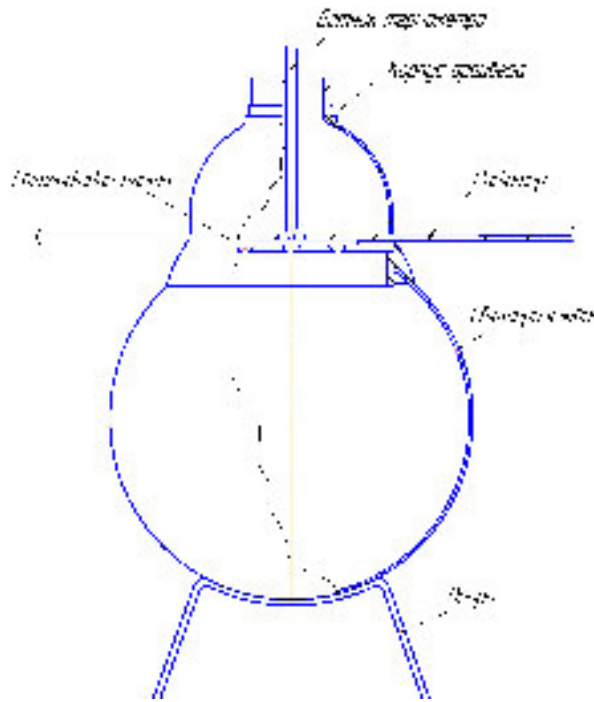


Рис.1 - Дослідний макет світлодіодної лампи

Експериментальний зразок складається з світлодіодної плати, розміщеної в центрі радіатора, виконаного в вигляді одного або двох листів алюмінієвого сплаву АМЦ, кулеподібного світлорозсіювача діаметром 110 мм і пластмасового корпусу з драйвером. Для проведення температурних досліджень в центрі всіх пластин радіатора зроблено отвір, через який проходить і опирається в центр світлодіодної плати з її тильної сторони датчик термометра. В центрі світлодіодної плати зроблено лунку, яка фіксує положення датчика термометра, контакт здійснюється через теплопровідну пасту, краї отворів в пластинах радіатора виходять за межі лунки, з тим щоб датчик термометра мав контакт лише з світлодіодною платою. Світлодіодна плата представляє собою друковану плату з алюмінієвою основою, на якій розміщено 6 одноватних світлодіодів (робочий струм 350 мА). Живлення світлодіодної плати здійснюється від драйвера, вмонтованого в корпус.

Про деякі нюанси теплового опору

Не так давно з'явилась інформація про те, що в алюмінію з'явився гідний конкурент - теплорозсіююча пластмаса. Підтверджено експериментально, що теплопровідність λ матеріалу в 5-10 Вт/м·К необхідна і достатня, щоб передати на поверхню охолодження все тепло, яке максимально може бути сприйнято оточуючим повітрям, а використання матеріалів з більшою теплопровідністю є технічно надлишковим [2]. Для традиційних радіаторів з обмеженою поверхнею, що розсіює тепло, таке твердження видається справедливим. Ефективність радіатора характеризується таким параметром, як тепловий опір. Формально він аналогічний закону Ома, де різниця потенціалів замінена різницею температур, а струм – потужністю теплового потоку. На жаль, на цій подібності аналогія між електричним і тепловим опорами і закінчується. На відміну від електричного опору, величина якого не залежить від струму, що по ньому протікає, тепловий опір залежить від температури і відповідно від потужності теплового потоку.

Відомо, що існує три основних способи розповсюдження тепла в навколишньому середовищі: конвекція, теплопровідність або кондукція і випромінювання. Таким чином тепловий опір складається в основному з трьох складових частин, кожна з яких визначається одним з цих процесів.

Конвекційну складову теплового опору R_T^{kb} можна виразити формулою [3]:

$$R_T^{kb} = 1 / \alpha_k \cdot S_s, \quad (1)$$

де α_k - коефіцієнт конвекційного теплообміну між радіатором і середовищем;
 S_s - площа поверхні радіатора.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну залежить від багатьох чинників, в тому числі і від розташування охолоджуючої поверхні. Для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої горизонтально, нагрітою поверхнею доверху

$$\alpha_k = 1,3 A_2 \sqrt[4]{(T_1 - T_0)/h} \quad (2)$$

Для плоскої поверхні радіатора, орієнтованої вертикально

$$\alpha_k = A_2 \sqrt[4]{(T_1 - T_0)/h} \quad (3)$$

Як видно з формул (2) і (3) горизонтальне розташування, подібне до нашого, найефективніше. Ефективність вертикальних поверхонь, притаманних традиційним радіаторам, на 30 % менша.

Коефіцієнт A_2 для повітряного середовища вибирається з таблиці 1 в залежності від середньої температури $T_{сер} = (T_1 - T_0)/2$.

Таблиця 1.

Залежність коефіцієнта A_2 від температури

$T_{сер}$	0	10	20	30	40	80	80	100	120	140	150
A_2	1,42	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245

При передачі тепла шляхом теплопровідності тепловий опір залежить від фізичних властивостей матеріалу, через який проходить тепловий потік, і його геометричних розмірів [3]:

$$R_T^{kd} = \delta / \lambda S, \quad (4)$$

де δ - товщина матеріалу, через який проходить тепловий потік,
 λ - коефіцієнт теплопровідності, S - поперечний розріз матеріалу.

Для діапазону температур, в якому працюють СД, впливом теплового випромінювання на охолодження нагрітого радіатора можна знехтувати [4].

Таким чином загальний опір нашого радіатора можна звести до двох складових: **кондукційної**, яка визначається теплопровідністю радіатора, і **конвекційної**, яка визначається теплорозсіюючою здатністю поверхні радіатора. Відповідно в нашому експериментальному зразку лампи можна виділити закриту з двох сторін центральну частину радіатора, яка відповідає за передачу тепла від світлодіодної плати до теплорозсіюючої поверхні радіатора, тобто за кондукційну складову теплового опору, і відкриту периферію радіатора, яка відповідає за розсіювання тепла в навколишнє середовище, тобто за конвекційну складову.

Складаючи пакет радіатора з двох пластин, ми тим самим змінюємо (подвоюємо) його теплопровідність і, відповідно, зменшуємо (вдвічі) кондукційну складову теплового опору. При цьому, другу складову, яка визначається теплорозсіюючою спроможністю радіатора, будемо вважати незмінною, оскільки незмінними залишаються розміри і стан поверхні радіатора. В цьому припущенні є деяка похибка, але її вплив мінімізується тим, що експеримент проводиться саме в зоні малої чутливості теплового опору до зміни теплопровідності. При необхідності можна

ввести поправку, користуючись формулою (2) і таблицею 1. Попередні розрахунки показують, що в нашому діапазоні температур ця поправка не вносить суттєвих змін в співвідношення складових теплового опору.

Змінюючи площу периферійної частини пластини радіатора при тій же її товщині, ми змінюємо конвекційну складову теплового опору при незмінній величині його кондукційної складової.

Результати експерименту

Результати експерименту наведені в таблиці 2. В першому стовпчику таблиці вказана питома площа поверхні радіатора (S/P , $\text{см}^2/\text{Вт}$). Питома площа – це відношення загальної площі охолоджуючої поверхні радіатора до потужності світлодіодної плати, яка приходить на теплові втрати. При обчисленні загальної площі враховується площа обох сторін радіатора за винятком закритих поверхонь його центральної частини. За теплові втрати беремо 75 % від споживаної світлодіодами потужності. В такому припущенні теж є певна похибка, але в нашому випадку вона допустима, оскільки нас цікавлять не абсолютні значення складових теплового опору, а їх співвідношення. Саме тому експеримент проводиться з однією і тією ж світлодіодною платою, з одним і тим же драйвером та забезпечується максимальна ідентичність інших умов експерименту при переході від однієї до двох пластин радіатора.

Таблиця 2

Залежність перепаду температури і теплового опору від теплопровідності (кількості пластин радіатора) для різних розмірів охолоджуючої поверхні радіатора

S/P , $\text{см}^2/\text{Вт}$	Перепад температури, $^{\circ}\text{C}$		Тепловий опір, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	
	1 пластина (0,5 мм)	2 пластини (2x0,5мм=1 мм)	1 пластина (0,5 мм)	2 пластини (2x0,5мм=1 мм)
20	46,6	45,6	9,32	9,12
30	39,2	38,0	7,84	7,6
50	34,2	31,1	6,84	6,22
100	28,0	24,8	5,6	4,96
180	24,6	19,2	4,92	3,84

Математична інтерпретація результатів експерименту

Повертаючись до описаних вище складових теплового опору спробуємо пов'язати їх з даними експерименту. В нашому експерименті їх можна чітко розмежувати, – перша визначається товщиною пакета пластин радіатора, друга – розмірами і станом охолоджуючої поверхні. Загальний опір складається з їх суми, бо при всій складності теплових процесів в радіаторі спочатку тепло необхідно донести до периферійної поверхні радіатора, а вже потім передати його оточуючому повітрю.

Математично для однієї пластини це можна виразити так:

$$R_1 = R_T^{\text{кд1}} + R_T^{\text{кв}}, \quad (6)$$

де R_1 – загальний тепловий опір радіатора з однієї пластини;

$R_T^{\text{кд1}}$ – складова частина, що визначається теплопровідністю радіатора з однієї пластини (товщиною 0,5 мм), її можна вважати кондукційною;

$R_T^{\text{кв}}$ – складова частина, що визначається теплорозсіюючою здатністю радіатора, її можна вважати конвекційною.

Для набору з двох пластин (загальна товщина $2 \times 0,5 \text{ мм} = 1 \text{ мм}$) це рівняння так:

$$R_2 = R_T^{кд2} + R_T^{кв} = R_T^{кд1} \cdot 1/2 + R_T^{кв}, \quad (7)$$

де R_2 – загальний тепловий опір радіатора з двох пластин загальною товщиною 1 мм;

$R_T^{кд2}$ – складова частина, що визначається теплопровідністю (кондукційна складова) радіатора з двох пластин загальною товщиною 1 мм.

Таким чином маємо систему двох рівнянь з двома невідомими, розв'язавши яку отримуємо співвідношення кондуктивної і конвекційної складових теплового опору для радіаторів завтовшки 0,5 мм і 1 мм.

$$R_T^{кд1} = 2(R_1 - R_2) \quad (8)$$

$$R_T^{кд2} = R_1 - R_2 \quad (9)$$

$$R_T^{кв} = R_1 - 2(R_1 - R_2) = 2 R_2 - R_1 \quad (10)$$

В таблиці 3 представлено результати рішення вказаної системи рівнянь для різних значень питомої площі радіатора.

Таблиця 3

Співвідношення $R_T^{кд}$ і $R_T^{кв}$ для різних значень питомої площі радіатора

S/P, см ² /Вт		20	30	50	100	180
Сумарне значення теплового опору, °C/Вт	0,5 мм	9,32	7,84	6,84	5,6	4,96
	1 мм	9,12	7,6	6,22	4,92	3,84
Кондукційна складова, °C/Вт	0,5 мм	0,4	0,44	1,24	1,36	2,24
	1 мм	0,2	0,22	0,62	0,68	1,12
Конвекційна складова (0,5 мм і 1 мм), °C/Вт		8,92	7,36	5,6	4,24	2,72

На рис. 2 ці співвідношення представлено в графічній формі

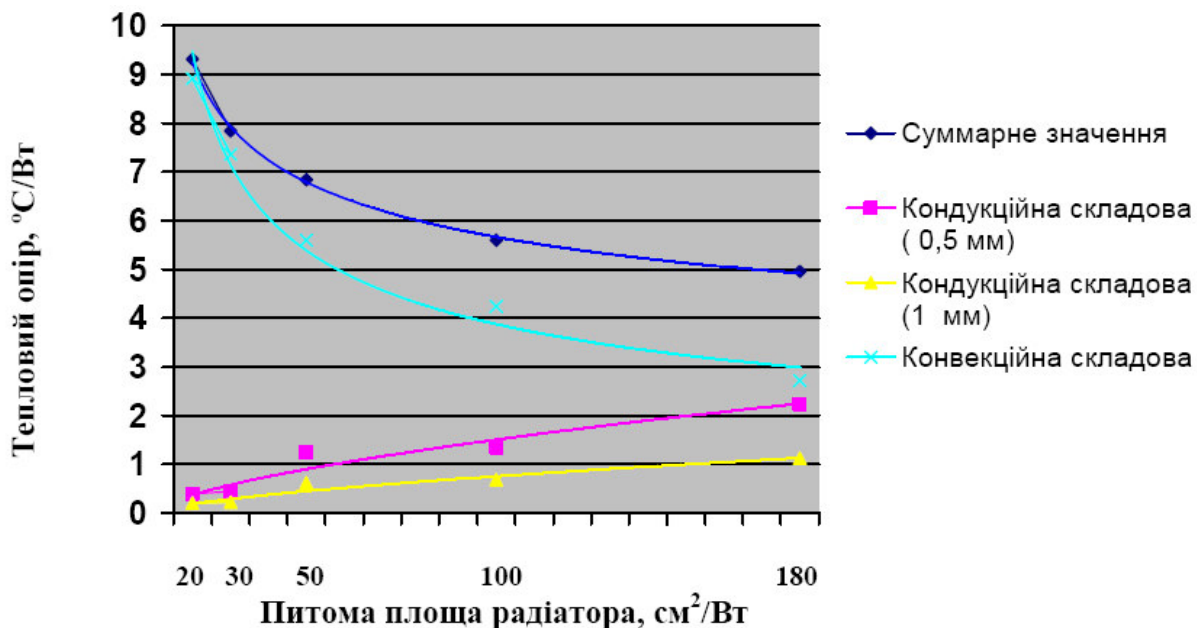


Рис. 2 – Залежність складових теплового опору від розмірів радіатора

Як видно з отриманих даних, теплопровідність і пов'язана з нею кондукційна складова теплового опору радіатора відіграє тим більшу роль, чим більша площа охолоджуючої поверхні радіатора. Для радіаторів з досить **розвиненою** поверхнею

охолодження (біля $50 \text{ см}^2/\text{Вт}$ і більше), теплопровідність (кількість пластин) суттєво впливає на значення теплового опору. Для **малоефективних** радіаторів з питомою площею $30 \text{ см}^2/\text{Вт}$ і менше цей вплив суттєво менший. І чим менша площа радіатора, тобто чим менша ефективність радіатора, тим меншу роль відіграє і теплопровідність.

Але ж нас цікавить саме ефективний радіатор. І тут дані експерименту свідчать не на користь теплорозсіюючої пластмаси. Очевидно це в повній мірі стосується закритих світильників і всіх інших умов погіршеної конвекції.

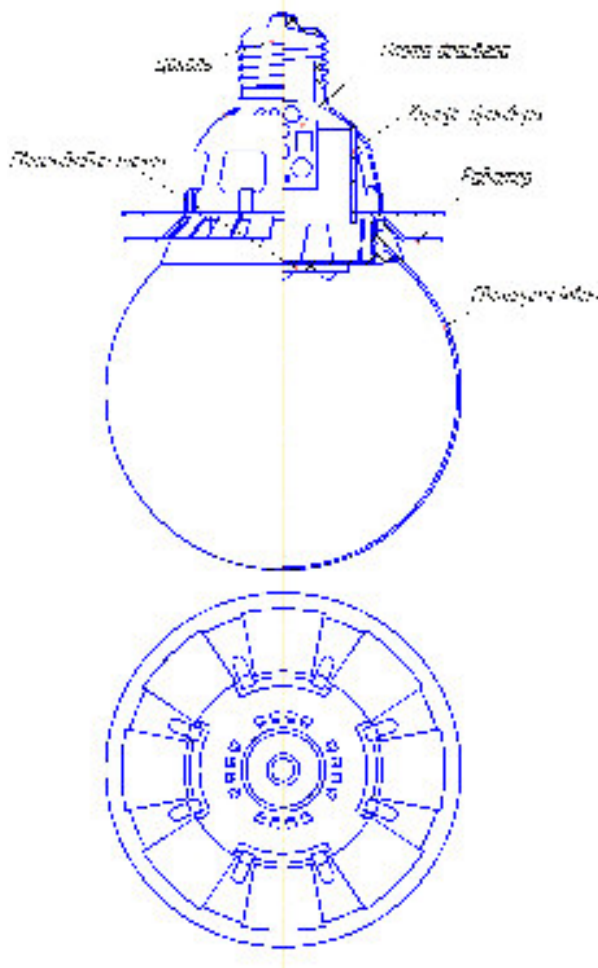


Рис. 3 – Склад світлодіодної лампи-світильника

тепла в оточуючому середовищі.

На секторах нижнього шару формуються (штампуються) виступи, за допомогою яких здійснюється кріплення радіатора з корпусом драйвера. Отвори, що утворюються після штамповки виступів, збільшують потоки повітря, що охолоджує радіатор.

Радіатор, сформований з листа, має значно меншу вагу порівняно з литими радіаторами з такою ж теплорозсіюючою здатністю.

Кульовий світлорозсіювач в поєднанні з зонтоподібним радіатором гармонізує дизайн СДЛ і створює оптимальний світлорозподіл лампи.

В даній моделі використано корпус драйвера, з внутрішнім і зовнішнім стаканами. Внутрішній стакан створює закритий від зовнішнього доступу простір для драйвера, а зовнішній має широкі вікна, які створюють додаткові умови охолодження радіатора.

Опис моделі лампи-світильника

На підставі наведених вище експериментальних даних було розроблено модель лампи-світильника (рис. 3). Від експериментального зразка лампа-світильник відрізняється наступними деталями. Світлорозсіювач має пластмасову горловину, тому світлодіодну плату необхідно опустити на рівень нижньої кромки горловини. Таким чином у радіатора появляється центральна циліндрична частина з дном, на якому кріпиться світлодіодна плата. На циліндричній частині формується гвинтова різьба, яка служить для кріплення світлорозсіювача. Циліндрична частина являється теплопроводом між світлодіодною платою і периферійною частиною радіатора. Щоб не зменшити теплопровідність вона формується з перекриттям країв парних і непарних секторів. При переході в периферію сектори створюють два шари охолоджуючої поверхні радіатора, що посилює розсіювання

Представлену модель СДІ можна класифікувати як лампу-світильник. Для її установки на підвісній стелі достатньо на одній з панелей закріпити патрон під цоколь E27, як це показано на фото (рис. 4).



Рис. 4 – Загальний вигляд лампи-світильника

Наведемо думку одного з відомих в галузі світлотехніки спеціалістів (Андрій Туркін, керівник групи розвитку компанії Xlight) [5] : «Робити лампи зі стандартним цоколем під стандартні патрони (E27) на світлодіодах **і використовувати їх у стандартних світильниках** в силу багатьох причин **не зовсім правильно** (інший, ніж у ламп розжарювання розподіл світла, принципово інший характер відводу тепла і т.д.)». До цього можна додати - світлодіодна лампа неможлива без радіатора. А радіатор потребує чітко визначеного режиму охолодження, який можна створити лише в комплексі лампа-світильник.

На рис. 5 показано видозмінений варіант представленої вище лампи-світильника в безцокольному виконанні з використанням існуючого (стандартного) світильника.

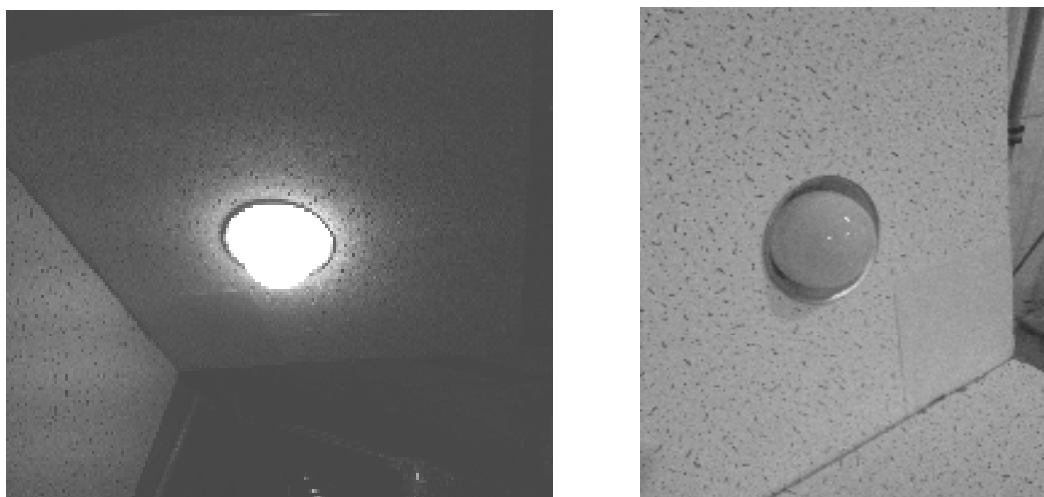


Рис. 5 – Загальний вигляд лампи-світильника в безцокольному виконанні з використанням існуючого світильника

Радіатор і блок живлення лампи розраховані на потужності від 3 до 8 однофазних світлодіодів. В таблиці 4 представлено залежність теплового режиму

переходу корпус світлодіода – оточуюче повітря від потужності (кількості одноватних світлодіодів), а на рисунку 6 ця залежність представлена графічно.

На рис. 7 показані залежності світлового потоку лампи з 6-ю одноватними світлодіодами (а) та корельовано колірної температури (б) від часу з моменту вмикання лампи. Середній час стабілізації параметрів лампи складає 30 хв. з моменту вмикання.

Таблиця 4

Залежність теплового режиму лампи-світильника від потужності (кількості одноватних світлодіодів)

Кількість СД, шт	3	4	5	6	7	8
ΔT , °C	21,1	25,4	29,2	32,7	37,2	41,5
Тепловий опір, °C/Вт	9,46	8,67	7,76	7,2	7,03	6,87

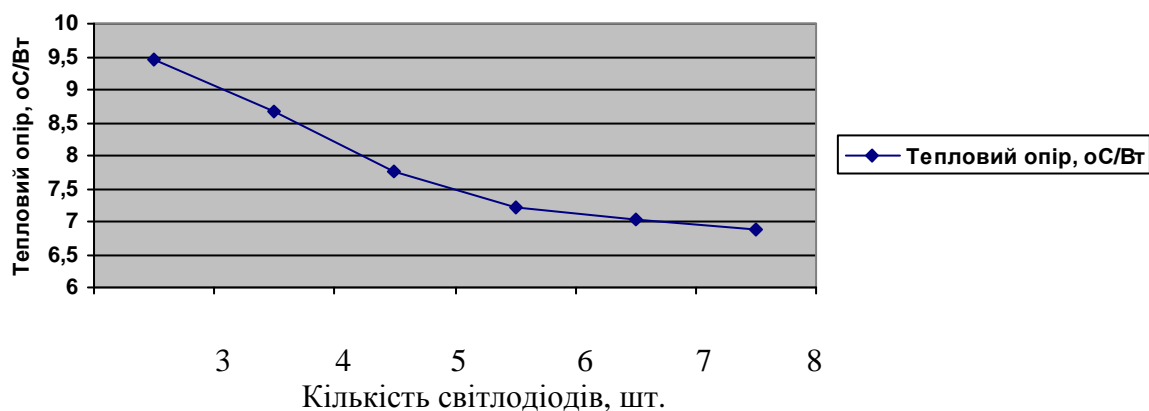


Рис. 6 – Залежність теплового опору від потужності (кількості світлодіодів)

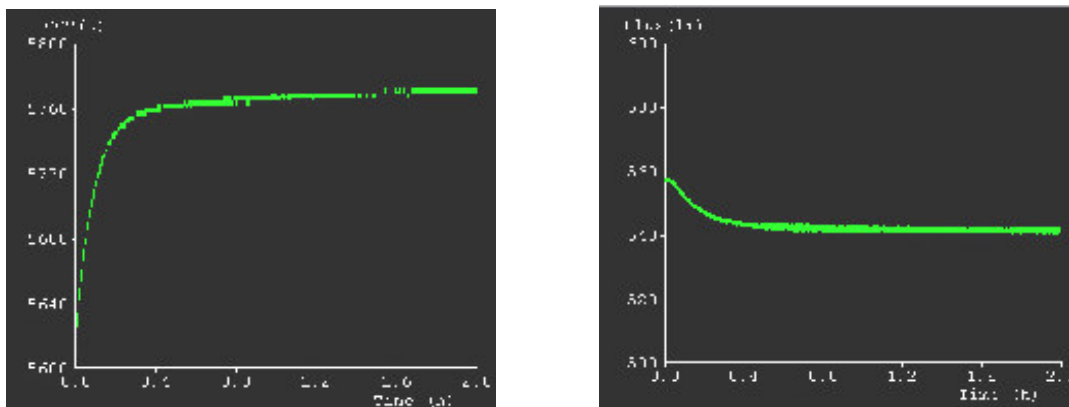


Рис.7 – Залежності світлового потоку лампи з 6-ю одноватними світлодіодами (а) та корельовано колірної температури (б) від часу з моменту вмикання лампи

На рис. 8 приведені спектральні характеристики та колірні параметри лампи з 6-ю світлодіодами в момент вмикання (а) та через 30 хвилин (б). Аналіз даних показує, що спад світлового потоку з моменту вмикання до стабілізації складає не більше 3%, що свідчить про якісну систему тепловідводу від потужних світло діодів.

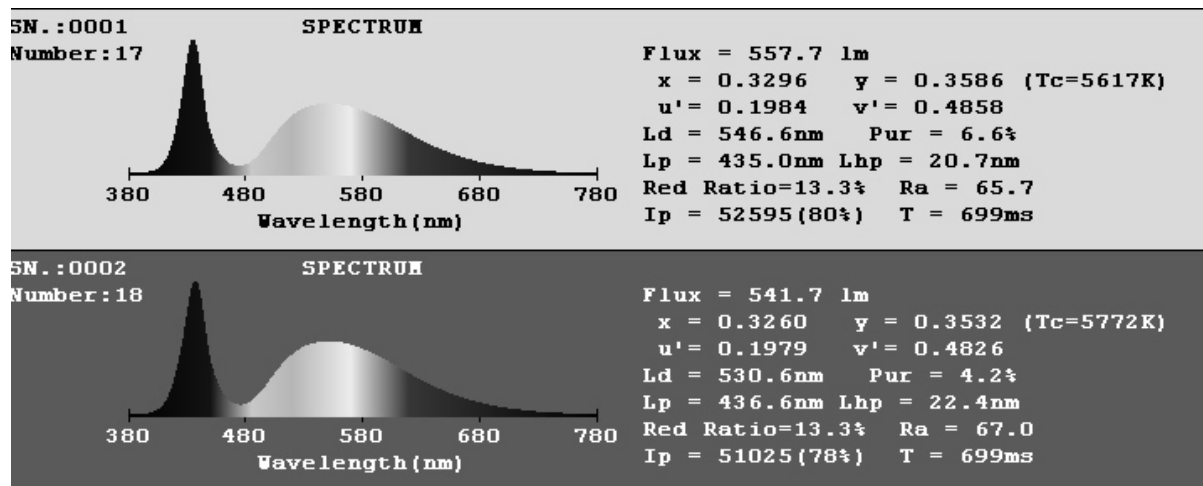


Рис.8 – Спектральні характеристики та колірні параметри лампи з 6-ю світлодіодами в момент вмикання (а) та через 30 хвилин (б)

Ці дані отримані з використанням світлодіодів XPE-HEW CREE (Cree). Майже аналогічні результати отримані при використанні світлодіодів SSC SZ5M-NW (Seoul Semiconductor). Основні характеристики таких світлодіодів приведені в таблиці 5.

Таблиця 5.
Характеристики світлодіодів, що використані в експерименті

	<i>SSC SZ5M-NW</i>	<i>Cree XP-E HEW</i>
Розміри, мм	3,5x3,5	3,45x3,45
Робочий струм, мА	350	350
Максимальний струм, мА	1200	1000
Пряма напруга, В	3,2	3,0
Світловий потік при струмі 350 мА, лм	135	122
Корельована колірна температура, К	4200	2600-8300
Світловіддача, лм/Вт	120	116
Температура кристалу T_j , °C	150	150
Тепловий опір $R_{\theta JS}$, °C/Вт	4,5	6

Висновки.

Конструкція розглянутої в роботі світлодіодної лампи та результати дослідження світлотехнічних параметрів лампи в процесі нагріву світловипромінювальних елементів дають всі підстави вважати, що запропонований варіант системи термостабілізації цих елементів дає змогу створювати світлодіодні лампи (включаючи спеціальні декоративні, або багатофункціональні з керованими параметрами) з загальною потужністю світлодіодів до 10-15 Вт. При цьому прогнозні дослідження показують, що використання світлодіодів зі світловіддачею більшою за 130 лм/Вт (при температурі світловипромінювального кристалу 85°C), які вже сьогодні з'явилися на ринку, при реалізації описаної конструкції лампи дають змогу забезпечити падіння світлового потоку з моменту вмикання до моменту стабілізації не більше 10% при загальній потужності лампи до 20 Вт.

Література

1. Peter Marx. LED-Anwendungstechnik/Licht, 2009, №3, с. 184-188)

2. Криваткин А., Сакуненко Ю. Применение теплорассеивающих пластмасс для охлаждения LED кристаллов// <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2327/doc>
3. Курочка И.Н. Исследование тепловых процессов // <http://leddesign.com.ua/publications/issledovaniya-teplovyyih-protsessov.html>
4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005.
5. Битва за экономию: похоронка для ламп накаливания. <http://www.goodlamps.ru/articles/73/>

СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА-СВЕТИЛЬНИК И НЕКОТОРЫЕ НЮАНСЫ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В. М. Сорокин, В. П. Копнин, А. Ф. Серый

Предложен вариант системы термостабилизации для светодиодной лампы прямой замены с цоколем E27. Приводятся результаты исследований временных характеристик оптических параметров лампы и времени стабилизации. Определяется влияние площади рабочей поверхности радиатора на кондукционную и конвекционную составляющие теплового сопротивления. Прогнозируется возможность создания ретрофитов мощностью до 20 Вт со спадом светового потока до момента стабилизации не более 10%.

LED LAMPS AS LIGHT FIXTURES AND SOME NUANCES OF THERMAL RESISTANCE

V. M. Sorokin, V. P. Kopnin, A. F. Seriy

A variant of the temperature stabilization system for a direct replacement LED bulb with E27 base proposed. The results of research time characteristics of the optical parameters of the lamp and the stabilization time are demonstrated. Determined the influence of surface area of heat sink on conduction and convection components of heat resistance. Projected ability to create retrofit up to 20 watts with a flux decline until stabilization is not more than 10%.